中国主要含油气盆地天然气中汞的来源与分布

刘全有^{1,2*}, 彭威龙^{1,2}, 李剑³, 吴小奇⁴

1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

4. 中国石化石油勘探开发研究院四川地区勘探开发研究中心, 成都 610041

* 通讯作者, E-mail: qyouliu@sohu.com; liuqy.syky@sinopec.com

收稿日期: 2019-11-29; 收修改稿日期: 2020-02-25; 接受日期: 2020-02-28; 网络版发表日期: 2020-03-11

国家自然科学基金项目(批准号: 41625009、41872122和41902160)、中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA14010404)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0603102)和中国博士后科学基金项目(批准号: 2019M650967)资助

摘要 基于我国4个主要含油气盆地146口钻井天然气中汞含量分析,并结合气体地球化学分析,识别了我国主要含油气盆地天然气中汞的来源与分布特征。研究表明,我国含油气盆地天然气中汞的含量差异较大,分布在 $0.01\sim 4050\mu\text{g}/\text{m}^3$,其中汞含量最高的气井位于松辽盆地徐深气田。克拉通盆地中汞含量相对较低,其中塔里木盆地次生气藏中汞含量最低;在裂谷盆地中由于存在深切基底的大断裂,存在深部流体混入的地质条件,天然气中的汞含量可能异常高,例如松辽盆地徐深气田。在深大断裂不发育的相对稳定盆地,天然气中汞主要是有机成因;在有深部流体混入的裂谷盆地气藏中,天然气中的汞可能主要来自深部,并且以汞含量和R/Ra值异常高为主要特征。

关键词 天然气; 汞含量; 含油气盆地; 徐深气田; 深部流体

1 引言

天然气中普遍含有不等量的单质汞(Leeper, 1980; Bingham, 1990; Hennico等, 1991; Wongkasemjit和Wasantakorn, 2000; 陈践发等, 2001; 戴金星等, 2001; Ryzhov等, 2003; 韩中喜等, 2013; 刘全有, 2013; Li等, 2017; Tang等, 2019)。汞不仅对生态环境有污染,而且汞的吸附作用会在天然气利用过程中导致设备故障,甚至造成破坏性事故(Bingham, 1990; Haselden, 1981; Leeper, 1980; Wongkasemjit和Wasantakorn, 2000; Ez-

zeldin等, 2016; Peng等, 2019)。长期处于汞超标的环境中可引起神经系统、心血管、皮肤等各类疾病(Cortes-Maramba等, 2006; Virtanen等, 2007; Wastenson等, 2006)。由此可见,天然气中汞含量过高可能会污染环境并且对用户身体健康带来影响,并可能带来安全隐患。通常认为,天然气中的汞主要来源于气源岩成烃过程(Frankiewicz等, 1998; 陈践发等, 2001; Haitzer et al., 2002; Peng等, 2019; Tang等, 2019)。由于陆源有机质(如煤和碳质泥岩)中相对富集汞(Philips, 2003; Ren等, 1999; 冯新斌等, 1998),所以来源于

中文引用格式: 刘全有, 彭威龙, 李剑, 吴小奇. 2020. 中国主要含油气盆地天然气中汞的来源与分布. 中国科学: 地球科学, 50: 645–650, doi: [10.1360/SSTe-2019-0281](https://doi.org/10.1360/SSTe-2019-0281)

英文引用格式: Liu Q, Peng W, Li J, Wu X. 2020. Source and distribution of mercury in natural gas of major petroliferous basins in China. Science China Earth Sciences, 63: 643–648, <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9596-6>

陆源有机质的煤成气中汞含量一般高于油型气(戴金星等, 2001)。在深切地幔的深大断裂带, 汞与其他挥发性组分会伴随着岩浆上升(Zettlitzer等, 1997; 陈践发等, 2000; Smith等, 2005; 李剑等, 2012), 如辽河盆地西部凹陷油型气中汞含量明显高于东部凹陷煤成气(陈践发等, 2000), 可能与存在深部汞有关。刘全有(2013)通过对塔里木盆地天然气中汞含量的分析, 指出天然气中汞含量主要受天然气成因、母质形成环境、构造活动的影响, 其中构造活动影响最大, 其次为母质形成环境。尽管国内外对自然界中汞的地球化学做了许多工作, 但相关工作多集中在环境地球化学中(冯新斌等, 1998; Cortes-Maramba et al., 2006; Tang等, 2017, 2019), 对天然气中汞的分布规律与主控因素还不是很清楚, 即对含油气盆地天然气中汞含量分布的研究较为薄弱, 天然气中汞含量的预测较为困难(刘全有, 2013; Tang等, 2019; Peng等, 2019; Li等, 2019)。我国含油气盆地众多, 本研究分别选取典型盆地实例——东部松辽盆地、中部四川盆地和鄂尔多斯盆地以及西部的塔里木盆地, 分析典型盆地天然气中汞的来源与分布特征。选取为实例的盆地中天然气资源较为丰富, 并且横跨我国三大含油气区, 包含裂谷盆地、克拉通盆地, 在克拉通基础上同时发育前陆拗陷, 因此具有较好的代表性。在对四大典型含油气盆地天然气中汞含量进行分析的基础上, 探讨天然气中汞的主要来源, 查明其分布规律, 为天然气中汞含量预测提供科学依据。

2 实验方法

文中样品均为气田生产井井口采集。气样采用承压为15MPa的钢瓶收集。汞的收集装置主要包括捕汞管、流量计、干燥管、秒表、量筒、敞口瓶等。用橡胶管将汞的收集装置与天然气井口连接。采用排水法计量通过汞收集装置的气体量。捕汞管是利用了黄金对汞的吸附原理。在捕汞管内置纯度为99.999%的金丝对天然气中的汞吸附。关于汞的具体收集方法, 徐永昌(1994)做过详细报道。完成汞的取样后, 将汞的收集装置放置在加热炉中, 将炉温升至800℃并保持30s, 使收集装置中的汞解析成汞蒸气并吹扫至分析仪器中开展汞含量分析, 其中氩气为载气, 载气吹扫速度设定为0.5L/min。汞含量采用XG-4塞曼测汞仪分析, 检测限

均小于0.02ng, 重复进样分析, 调整仪器使分析误差小于3%(刘全有, 2013)。使用上述实验方法, 对塔里木、四川、鄂尔多斯和松辽盆地的徐深气田和朝阳沟地区天然气中汞含量进行了测量。

为了对比分析天然气中汞的来源, 作者对天然气中稀有气体氦气同位素组成($^3\text{He}/^4\text{He}$)也开展了分析。氦气同位素组成采用Nobleless SFT型稀有气体质谱仪分析。将含有气样的钢瓶连接到质谱仪的样品净化系统上。对体系抽真空至体系压强小于2Pa, 截取2cm³ STP气体导入稀有气体净化系统; 采用海绵钛炉和吸气泵除去样品中的杂质气体。气体净化后进入稀有气体质谱仪分析系统, 分析氦气同位素组成。稀有气体同位素组成具体的分析方法可以参考相关文献(徐永昌等, 1998)。

3 天然气中汞含量

对塔里木盆地不同构造单元气藏中汞含量开展了分析, 研究表明塔里木盆地19个煤成气样品中汞含量分布在0.015至296.76μg/m³之间, 平均值为26.98μg/m³; 22个油型气样品中汞含量分布在0.014至28.11μg/m³之间, 平均值为5.39μg/m³; 其中塔西南前陆拗陷天然气中汞含量明显异常高, 最高达296.76μg/m³, 表明构造活动对天然气中汞含量的明显控制作用(刘全有, 2013)。鄂尔多斯盆地为典型克拉通盆地, 主要发育上古生界煤成气, 对鄂尔多斯盆地32个气样的分析表明, 汞含量分布在0.2到37.4μg/m³, 平均值为4.3μg/m³。总体上鄂尔多斯盆地煤成气中汞含量较高, 由于缺乏深大断裂, 气藏中汞可能主要来自煤系烃源岩的热演化。四川盆地49个天然气样品中汞含量分布介于1.0~40.4μg/m³, 平均值为9.3μg/m³; 四川盆地天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值处于 $n \times 10^{-8}$, 指示其为典型的克拉通地块, 构造相对稳定(Ni等, 2014), 其天然气中的汞主要来自烃源岩。涂修元等(1986)对四川盆地同一口井的泥页岩和煤中汞含量进行了分析, 发现同一层位并且深度相近条件下煤中汞含量是泥页岩的2~5倍, 因此不同来源的天然气中汞含量存在一定的差异性。对松辽盆地徐深气田和朝阳沟气田天然气中汞含量的分析表明, 徐深气田17个天然气样品中汞含量分布在5~4050μg/m³, 平均值为1148μg/m³(图1); 对位于徐深气田东南部的朝阳沟气田而言, 其7个天然气样品中汞

图1 不同区块天然气中汞含量分布

含量分布在 $8\sim 28\mu\text{g}/\text{m}^3$, 平均值为 $21\mu\text{g}/\text{m}^3$. 徐深气田天然气中汞含量明显高于塔里木、四川、鄂尔多斯和松辽盆地朝阳沟气田, 可能与深部汞侵入有关.

4 天然气中汞来源与控制因素探讨

大气氮的同位素组成记为 R_a , 一般认为 R_a 分布在 $1.38\times 10^{-6}\sim 1.4\times 10^{-6}$, 计算时取 R_a 为 1.4×10^{-6} . 天然气中氮同位素值与空气中氮同位素值的比值记为 R/R_a , R/R_a 是天然气中是否混有深部幔源流体的良好示踪指标(Hiroshi和Yuji, 1983; 陶士振等, 2014; Dai等, 2017). 当 R/R_a 值小于0.1时, 四川、鄂尔多斯和塔里木盆地天然气为典型有机质热演化形成的天然气, 天然气中的汞主要来自有机质热演化生烃过程中伴随的汞, 汞以挥发组分的形式随天然气一起运移聚集(陈践发等, 2000, 2001; Peng等, 2019). 由图2可知, 在 R/R_a 小

于0.1时, 含量分布在 $0.1\sim 100\mu\text{g}/\text{m}^3$, 来自腐泥型和腐殖型的天然气中汞含量基本保持不变. 尽管戴金星等(1985, 2001)通过统计国内外不同成因天然气中汞含量发现腐殖天然气中汞含量通常大于 $700\text{ng}/\text{m}^3$, 腐泥型天然气中汞含量小于 $600\text{ng}/\text{m}^3$. 从塔里木盆地不同类型天然气中汞含量统计来看, 煤成气确实比油型气中汞含量高(刘全有, 2013), 但通过汞含量为 $500\sim 700\text{ng}/\text{m}^3$ 作为界限值来判识天然气成因可能过分地低估了腐泥型天然气中汞含量. 因此, 仅仅利用天然气中汞含量一个指标判识天然气成因可能造成误判.

在塔里木盆地的部分次生气藏中, 随着 R/R_a 比值增加, 尽管天然气既有油型气也有煤成气, 但它们的汞含量均低于 $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$, 如LN2-33-1、JN4-H2、JF1-13-4、HD2-7、TZ4-18-7、TZ621等井的油型气和HQ2井的煤成气. 这些井的油型气是深部早期形成的气藏经过调整作用运移至浅部形成的次生气藏(Xiao等, 1996; Wang等, 2004). 因为汞具有很强的挥发性(Feng等, 2008; Peng等, 2019), 在气藏改造过程中, 汞非常容易散失(刘全有, 2013), 从而造成改造后的气藏汞含量低. HQ2井天然气为上覆煤系烃源岩生成的煤成气向下运移至奥陶系成藏, 为上生下储型气藏(刘全有, 2013), 不利于汞在气藏中聚集. 因此, 气藏受到调整改造并不能引起天然气中汞富集, 反而会造成气藏中汞散失.

当 R/R_a 值介于0.1~1时, 如塔西南(AK1、KS102、和田河等)、松辽盆地朝阳沟地区, 天然气中存在深部幔源气体的混入, 但以有机质来源天然气为主(图2),

图2 中国主要含油气盆地天然气中汞含量与 R/R_a 关系图

汞含量主要受有机质中汞含量控制, 其次是受深部幔源汞混入量的控制. 当 R/R_a 值大于1时, 如徐深气田, 天然气以深部幔源气体为主, 也存在有机质来源天然气的贡献. 由于深部幔源汞含量异常高, 因此, 这类气藏中汞含量主要受深部幔源汞混入量的控制.

四川盆地和鄂尔多斯盆地典型克拉通盆地, 未见幔源组分混入(Dai等, 2005; Ni等, 2014), 天然气为典型有机质热演化成因; 塔里木盆地天然气主要来自腐泥型或者腐殖型有机质的热演化(图2). 鉴于有机成因的天然气中汞含量要明显低于幔源成因的天然气, 笔者推测天然气中单质汞的含量可以作为地幔脱气的直接证据之一. 四川与鄂尔多斯盆地天然气中 R/R_a 值明显偏低, 同时汞含量也偏低, 而徐深气田天然气中汞含量明显偏高, 对应的 R/R_a 值也明显偏高(图2). 徐深气田天然气中汞含量的变化是地幔脱气挥发分中汞贡献的不同所致.

前人研究表明有机成因烷烃气负碳同位素系列一般不会延伸至丁烷(Dai等, 2016). 徐深气田天然气部分样品具有完整的负碳同位素系列, 负碳同位素系列延伸至丁烷, 即 $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$, 表明徐深气田天然气可能并不全是有机质热演化所形成(Liu等, 2016). 前人常用 R/R_a 、 $CO_2/^3He$ 以及 $CH_4/^3He$ 等参数值来建立典型壳源和幔源的端元标准解释天然气成因(Liu等, 2019). 结合徐深气田 R/R_a 和 $CO_2/^3He$ 的相关关系(Liu等, 2016)、异常重的烷烃气碳同位素组成以及完整的负碳同位素系列, 综合推测徐深气田存在深部流体的混入, 并且深部流体中包含一定量的汞和烷烃气. 徐深气田(包括昌德气藏、新城气藏以及徐深21气藏等)天然气整体上具有异常高的汞含量, 天然气中汞含量分布于 $5 \sim 4050 \mu g/m^3$, 平均值为 $1148 \mu g/m^3$ (图3). 具体到产气井, 则表现为与断裂的连通性越好, 产气井中天然气汞含量越高. 在徐深气田发育多条断穿基底的

图3 徐深气田流体转移剖面示意图

大断裂, 尤其是徐东大断裂、徐中大断裂以及徐西大断裂, 分别直接沟通基底与徐深21气藏、新城气藏以及昌德气藏(图3), 可作为汞等深部流体的直接运移通道. 推测在深部流体运移通道发育的地质背景下, 天然气中异常高的汞含量可以辅助指示气藏中汞可能主要来自深部流体.

5 结论

对我国4个主要含油气盆地146口钻井天然气中汞含量的分析表明, 天然气中汞的含量差异较大, 分布在 $0.01\sim 4050\mu\text{g}/\text{m}^3$. 汞含量最高的井位于松辽盆地徐深气田, 汞含量最低的气井位于塔里木盆地的次生气藏中. 尽管天然气中汞既有有机来源, 也有深部无机来源, 但是在深部流体运移通道发育的地质背景下, 天然气中汞含量异常高是气藏混有深部流体的直接证据之一. 在稳定的克拉通盆地天然气中汞主要是有机成因, 但是在裂谷盆地中, 尤其是深大断裂存在的条件下, 天然气中深部来源的汞含量可能与有机成因汞的含量不在一个数量级, 从而可以掩盖少量的有机成因汞.

6 展望

虽然本文初步理清含油气盆地天然气中汞的来源与分布特征, 但是对油气中汞的地球化学研究还处于起步阶段, 例如不同沉积环境下烃源岩及其形成油气中汞含量与同位素的差异, 热演化程度与油气成藏过程分别对汞的富集有何影响, 深部来源汞与有机成因汞如何区别等都是亟待解决的前沿科学问题. 利用油气中汞的含量及其同位素组成有望深入认识上述科学问题.

致谢 感谢中国石油勘探开发研究院戴金星院士的悉心指导, 感谢审稿专家提出的建设性意见.

参考文献

- 陈践发, 妥进才, 李春圆, 陈振岩, 张占文, 朴明植. 2000. 辽河坳陷天然气中汞的成因及地球化学意义. *石油勘探与开发*, 27: 23–24
- 陈践发, 王万春, 朱岳年. 2001. 含油气盆地中天然气汞含量的主要

- 影响因素. *石油与天然气地质*, 22: 352–354
- 戴金星, 戚厚发, 王少昌, 宋岩, 关德师, 许化政. 2001. 我国煤系的气油地球化学特征、煤成气藏形成条件及资源评价. 石油工业出版社, 北京
- 戴金星, 戚厚发, 宋岩. 1985. 鉴别煤成气和油型气若干指标的初步探讨. *石油学报*, 6: 31–38
- 冯新斌, 洪业汤, 倪建宇. 1998. 贵州煤中汞的分布、赋存状态及对环境的影响. *煤田地质与勘探*, 26: 12–14
- 韩中喜, 李剑, 严启团, 王淑英, 葛守国, 王春怡. 2013. 天然气汞含量作为煤型气与油型气判识指标的探讨. *石油学报*, 34: 233–327
- 李剑, 韩中喜, 严启团, 王淑英, 葛守国, 王春怡. 2012. 中国气田天然气中汞的成因模式. *天然气地球科学*, 23: 413–419
- 刘全有. 2013. 塔里木盆地天然气中汞含量与分布特征. *中国科学: 地球科学*, 43: 789–797
- 涂修元, 吴学明, 陶庆才. 1986. 论我国天然气中汞分布的几个特征. 北京: 石油工业出版社. 305–314
- 陶士振, 刘德良, 李振生, 谈迎. 2014. 无机成因气. 合肥: 中国科学技术大学出版社
- 徐永昌, 沈平, 刘文汇. 1998. 天然气中稀有气体地球化学. 北京: 科学出版社
- 徐永昌. 1994. 天然气成因理论及应用. 北京: 科学出版社
- Bingham M D. 1990. Field detection and implications of Mercury in natural gas. *SPE Product Eng*, 5: 120–124
- Cortes-Maramba N, Reyes J P, Francisco-Rivera A T, Akagi H, Sunio R, Panganiban L C. 2006. Health and environmental assessment of mercury exposure in a gold mining community in Western Mindanao, Philippines. *J Environ Manage*, 81: 126–134
- Dai J, Li J, Luo X, Zhang W, Hu G, Ma C, Guo J, Ge S. 2005. Stable carbon isotope compositions and source rock geochemistry of the giant gas accumulations in the Ordos Basin, China. *Org Geochem*, 36: 1617–1635
- Dai J, Ni Y, Gong D, Feng Z, Liu D, Peng W, Han W. 2016. Geochemical characteristics of gases from the largest tight sand gas field (Sulige) and shale gas field (Fuling) in China. *Mar Petrol Geol*, 79: 426–438
- Dai J, Ni Y, Qin S, Huang S, Gong D, Liu D, Feng Z, Peng W, Han W, Fang C. 2017. Geochemical characteristics of He and CO₂ from the Ordos (cratonic) and Bohaibay (rift) basins in China. *Chem Geol*, 469: 192–213
- Ezzeldin M F, Gajdosechova Z, Masod M B, Zaki T, Feldmann J, Krupp E M. 2016. Mercury speciation and distribution in an Egyptian natural gas processing plant. *Energ Fuel*, 30: 10236–10243
- Feng X B, Foucher D, Hintelmann H, Qiu G, Li G, Han H, He T. 2008. Mercury isotopic ratios of soil and sediment samples collected from contaminated areas in China. *Geochim Cosmochim Acta*, 72: 3292
- Frankiewicz T C, Curiale J A, Tussanayakul S. 1998. The geochemistry

- and environmental control of mercury and arsenic in gas, condensate, and water produced in the Gulf of Thailand. *AAPG Bull*, 82: 3
- Haitzer M, Aiken G R, Ryan J N. 2002. Binding of mercury (II) to dissolved organic matter: The role of the mercury-to-DOM concentration ratio. *Environ Sci Technol*, 36: 3564–3570
- Haselden G G. 1981. The challenge of LNG in the 1980's. *Mech Eng*, 103: 46–53
- Hiroshi W, Yuji S. 1983. $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in CH_4 -rich natural gases suggest magmatic origin. *Nature*, 305: 792–794
- Hennico A, Barthel Y, Cosyns J, Courty P. 1991. Mercury and arsenic removal in the natural gas, refining and petrochemical industries. *Oil Gas*, 17: 36–38
- Leeper J E. 1980. Mercury—LNG's problem. *Hydrocarb Process*, 59: 237–240
- Li J, Li Z, Wang X, Wang D, Xie Z, Li J, Wang Y, Han Z, Ma C, Wang Z, Cui H, Wang R, Hao A. 2017. New indexes and charts for genesis identification of multiple natural gases. *Petrol Explor Dev*, 44: 535–543
- Li J, Han Z, Yan Q, Wang S, Ge S. 2019. Distribution and genesis of mercury in natural gas of large coal derived gas fields in China. *Petrol Explor Dev*, 46: 463–470
- Liu Q, Dai J, Jin Z, Li J, Wu X, Meng Q, Yang C, Zhou Q, Feng Z, Zhu D. 2016. Abnormal carbon and hydrogen isotopes of alkane gases from the Qingshen gas field, Songliao Basin, China, suggesting abiogenic alkanes? *J Asian Earth Sci*, 115: 285–297
- Liu Q, Wu X, Wang X, Jin Z, Zhu D, Meng Q, Huang S, Liu J, Fu Q. 2019. Carbon and hydrogen isotopes of methane, ethane, and propane: A review of genetic identification of natural gas. *Earth-Sci Rev*, 190: 247–272
- Ni Y, Dai J, Tao S, Wu X, Liao F, Wu W, Zhang D. 2014. Helium signatures of gases from the Sichuan Basin, China. *Org Geochem*, 74: 33–43
- Ren D, Zhao F, Wang Y, Yang S. 1999. Distributions of minor and trace elements in Chinese coals. *Int J Coal Geol*, 40: 109–118
- Peng W, Liu Q, Feng Z, Fang C, Gong D, Li P, Lyu Y, Wang P. 2019. First discovery and significance of liquid mercury in a thermal simulation experiment on humic kerogen. *Energ Fuel*, 33: 1817–1824
- Phillips R L. 2003. Depositional environments and processes in Upper Cretaceous nonmarine and marine sediments, Ocean Point dinosaur locality, North Slope, Alaska. *Cretac Res*, 24: 499–523
- Ryzhov V V, Mashyanov N R, Ozerova N A, Pogarev S E. 2003. Regular variations of the mercury concentration in natural gas. *Sci Total Environ*, 304: 145–152
- Smith C N, Kesler S E, Klaue B, Blum J D. 2005. Mercury isotope fractionation in fossil hydrothermal systems. *Geology*, 33: 825–828
- Tang S, Feng C, Feng X, Zhu J, Sun R, Fan H, Wang L, Li R, Mao T, Zhou T. 2017. Stable isotope composition of mercury forms in flue gases from a typical coal-fired power plant, Inner Mongolia, northern China. *J Hazard Mater*, 328: 90–97
- Tang S, Zhou Y, Yao X, Feng X, Li Z, Wu G, Guangyou Z. 2019. The mercury isotope signatures of coalbed gas and oil-type gas: Implications for the origins of the gases. *Appl Geochem*, 109: 104415
- Virtanen J K, Rissanen T H, Voutilainen S, Tuomainen T P. 2007. Mercury as a risk factor for cardiovascular diseases. *J Nutr Biochem*, 18: 75–85
- Wang T G, Li S M, Zhang S C. 2004. Oil migration in the Lunnan region, Tarim Basin, China based on the pyrrolic nitrogen compound distribution. *J Petrol Sci Eng*, 41: 123–134
- Wastensson G, Lamoureux D, Sällsten G, Beuter A, Barregård L. 2006. Quantitative tremor assessment in workers with current low exposure to mercury vapor. *Neurotoxicol Teratol*, 28: 681–693
- Wongkasemjit S, Wasantakorn A. 2000. Laboratory study of corrosion effect of dimethyl-mercury on natural gas processing equipment. *J Corr Sci Eng*, 1: 12
- Xiao X, Liu D, Fu J. 1996. Multiple phases of hydrocarbon generation and migration in the Tazhong petroleum system of the Tarim Basin, People's Republic of China. *Org Geochem*, 25: 191–197
- Zettlitzer M, Scholer R, Falter R. 1997. Determination of elemental, inorganic and organic mercury in North German gas condensates and formation Brines. Houston: Proceedings of Symposium on Oil and Gas Chemistry, SPE Paper No. 37260

(责任编辑: 朱茂炎)